

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 551.584.4

ВЛИЯНИЕ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ НА ПОТОКИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ВО ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Е.М. Сатосина¹, Д.Ю. Гущина², М.А. Тарасова³, И.В. Железнова⁴, Е.Р. Емельянова⁵,
Р.Р. Гибадуллин⁶, А.М. Осипов⁷, А.В. Ольчев⁸

^{1–8} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра метеорологии и климатологии

^{1,5} Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН,
лаборатория эколого-климатических исследований

¹ Аспирант; e-mail: lisan.sat@gmail.com

² Проф., д-р геогр. наук; e-mail: dasha155@mail.ru

³ Аспирант; e-mail: mkolennikova@mail.ru

⁴ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: zheleznovaiv@my.msu.ru

⁵ Мл. науч. сотр., e-mail: katikget@yandex.ru

⁶ Бакалавр; e-mail: ravil00121@mail.ru

⁷ Вед. инж.; e-mail: sashaosipov@list.ru

⁸ Проф., д-р биол. наук; e-mail: aoltche@gmail.com

Современные изменения климата, сопровождающиеся быстрым ростом глобальной температуры воздуха, изменением режима осадков, повторяемости и интенсивности экстремальных погодных явлений, могут оказать существенное влияние на функционирование, рост и развитие лесных экосистем. Целью данного исследования являлась оценка влияния экстремальных погодных явлений (значительных положительных и отрицательных аномалий температуры воздуха и осадков) на потоки диоксида углерода (CO₂) в лесных экосистемах внетропических широт в Северном полушарии. Для анализа потоков были выбраны 26 станций мониторинга потоков парниковых газов глобальной сети FLUXNET с наиболее продолжительными рядами наблюдений. Станции расположены в лесных экосистемах, относящихся к разным типам биомов по классификации IGBP. Метеорологические условия на станциях анализировались с использованием данных наблюдений и данных реанализа ERA5. Результаты показали, что различия в отклике потоков CO₂ на аномалии температур и осадков были обусловлены главным образом типом лесной экосистемы, ее географическим положением и региональными климатическими условиями. Экстремально высокая температура воздуха в любое время года преимущественно приводит к усилению эмиссии CO₂ в атмосферу во всех рассмотренных типах лесных экосистем, при этом наибольший отклик отмечается в хвойных лесах. Отрицательные аномалии температуры воздуха в теплый период могут оказывать противоположное воздействие, приводя как к увеличению поглощения CO₂ лесными экосистемами, так и к его снижению в зависимости от типа биома. Устойчивых закономерностей отклика потоков CO₂ на экстремально низкие температуры в холодный период года выявлено не было. При выпадении интенсивных осадков в исследуемых лесных экосистемах отмечалась преобладающая эмиссия CO₂ в атмосферу. В то же время в теплое время года после выпадения большого количества осадков был выявлен кумулятивный эффект накопления влаги в корнеобитаемом слое почвы, в результате которого происходило усиление поглощения CO₂ растительностью на фоне роста скорости фотосинтеза растений в условиях достаточного почвенного увлажнения.

Ключевые слова: лесные экосистемы, реанализ, пульсационные измерения, FLUXNET

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.2

ВВЕДЕНИЕ

Таежные хвойные, смешанные хвойно-широколиственные и широколиственные леса умеренных широт, покрывающие большие площади суши в Се-

верном полушарии (около 17,5 млн км²), определяют радиационный, тепловой, водный и углеродный баланс значительных территорий, тем самым оказывая существенное влияние на региональные и глобаль-

ные климатические условия [FAO, 2020]. Современные изменения климата, проявляющиеся в росте глобальной температуры, изменении режима осадков и увеличении повторяемости экстремальных явлений погоды [Ritter et al., 2020; Frank et al., 2015; Kramer et al., 2020], могут оказывать существенное воздействие на функционирование и продуктивность лесных экосистем [Frank et al., 2015; Ummenhofer et al., 2017]. Устойчивость лесных экосистем, особенно к засухам, может существенно различаться для лесных биомов, что определяется прежде всего функциональными особенностями экосистем [Gazol et al., 2018]. Так, недавние исследования показали, что устойчивость экосистем лесов умеренных широт к экстремальным воздействиям, особенно лесов, расположенных вблизи южной границы ареала, медленно уменьшается на фоне роста температуры и увеличения дефицита почвенного увлажнения [Forzieri et al., 2022]. Результаты экспериментальных исследований показывают, что высокая повторяемость летних волн жары и засух в Северной Америке и Европе за последние два десятилетия оказала значительное воздействие на функционирование лесных экосистем, что отразилось на величине первичной продуктивности древостоев и результирующих потоках CO_2 между земной поверхностью и атмосферой [Ciais et al., 2005; Zhang et al., 2022; Xu et al., 2020]. Экстремально высокие температуры значительно снижают валовую (GPP) и нетто (NPP) первичную продукцию лесных насаждений на всех континентах [Xu et al., 2020]. Однако недавние исследования также показали, что, в зависимости от местных ландшафтных условий, волны жары могут привести как к значительному уменьшению, так и к увеличению скорости почвенного дыхания [Hoover et al., 2016; Anjileli et al., 2021]. Серьезными последствиями волн жары и засух в умеренных широтах также могут быть лесные пожары и вспышки массового размножения насекомых-вредителей, которые приводят к частичной или полной гибели лесной растительности, что непосредственно влияет на региональные климатические условия [Flannigan et al., 2000; Flower, Gonzalez-Meler, 2015; Кислов и др., 2019]. Не только экстремально высокие, но и экстремально низкие температуры воздуха (особенно внезапные заморозки) могут существенно влиять на функционирование и продуктивность лесных экосистем [Charrier et al., 2021].

Обильные осадки также оказывают негативное влияние на лесные биомы и приводят к аномалиям потоков CO_2 в лесных экосистемах [Gushchina et al., 2023]. В частности, обильные осадки после продолжительного периода сухой погоды могут привести к резкому увеличению скорости почвенного дыхания на фоне роста влажности почвы [Manzoni et al., 2020]. Этот эффект известен как «эффект Бирча»

[Birch, 1964]. Экстремальные осадки могут вызывать подтопление местности, что ведет к снижению скорости почвенного дыхания [Kramer et al., 2008]. Кроме того, сильные дожди, сопровождающиеся поверхностным переувлажнением почвы, могут вызвать сильную эрозию почвы и вымывание органического углерода за пределы экосистемы [Dinsmore et al., 2013].

Данные наблюдений, полученные для различных типов лесных биомов, выявили наличие противоположных тенденций в изменении составляющих углеродного баланса под воздействием экстремальных погодных явлений в разных географических регионах. Отличия в условиях роста и механизмах адаптации лесов к негативному воздействию атмосферных факторов (экстремальным температурам и осадкам) могут привести к значительным неопределенностям в оценках взаимосвязей между лесными экосистемами и атмосферой. Изучение отклика наземных экосистем на экстремальные погодные явления представляет собой сложную задачу, требующую экспериментальных и модельных исследований, что позволит обеспечить лучшее понимание процессов адаптации лесных экосистем и возможность прогнозирования реакции различных лесных биомов на воздействие внешних факторов [Gushchina et al., 2023].

Основная цель нашего исследования – оценить реакцию потоков CO_2 на экстремальные погодные явления (положительные и отрицательные аномалии температуры и осадков) в различных типах лесных экосистем внетропических широт. Было использовано несколько подходов к определению порогов экстремальности погодных явлений, что позволило оценить как мгновенное, так и запаздывающее влияние экстремальных погодных явлений на аномалии потоков CO_2 .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования влияния экстремальных температур и осадков на потоки CO_2 в лесных экосистемах внетропических широт были использованы данные метеорологических наблюдений и измерения потоков методом турбулентных пульсаций на станциях глобальной сети мониторинга за потоками парниковых газов FLUXNET [The Data Portal..., 2023]. Существующие пропуски в рядах метеорологических наблюдений заполнялись с использованием данных реанализа ERA5 [Smith, 2011]. В частности, были использованы данные о температуре воздуха на 2 м с трехчасовым разрешением, а также данные о количестве осадков с часовым разрешением для 1991–2021 гг.

Для анализа отклика внетропических лесных экосистем на экстремальные явления погоды было вы-

брано 26 станций мониторинга, имеющих длинные периоды наблюдений, находящихся в различных эколого-климатических условиях (рис. 1), а также в районах, характеризующихся наиболее значительным увеличением повторяемости экстремальных погодных явлений за последние десятилетия [Железнова и Гущина, 2023; FAO, 2020]. Выбранные станции относятся к пяти типам биомов в соответствии с международной классификацией, принятой в Международной геосферно-биосферной программе (International Geosphere-Biosphere Programme,

IGBP) и используемой в сети мониторинга потоков парниковых газов FLUXNET [Belward et al., 1999]: смешанные хвойно-широколиственные леса, широколиственные леса, хвойные вечнозеленые (таежные) леса, вечнозеленые широколиственные леса и хвойные листопадные (лиственничные) леса. Максимальный период непрерывных наблюдений на выбранных станциях составил 26 лет, минимальный – 3 года. Более детальные характеристики растительности на станциях мониторинга потоков представлены в таблице.

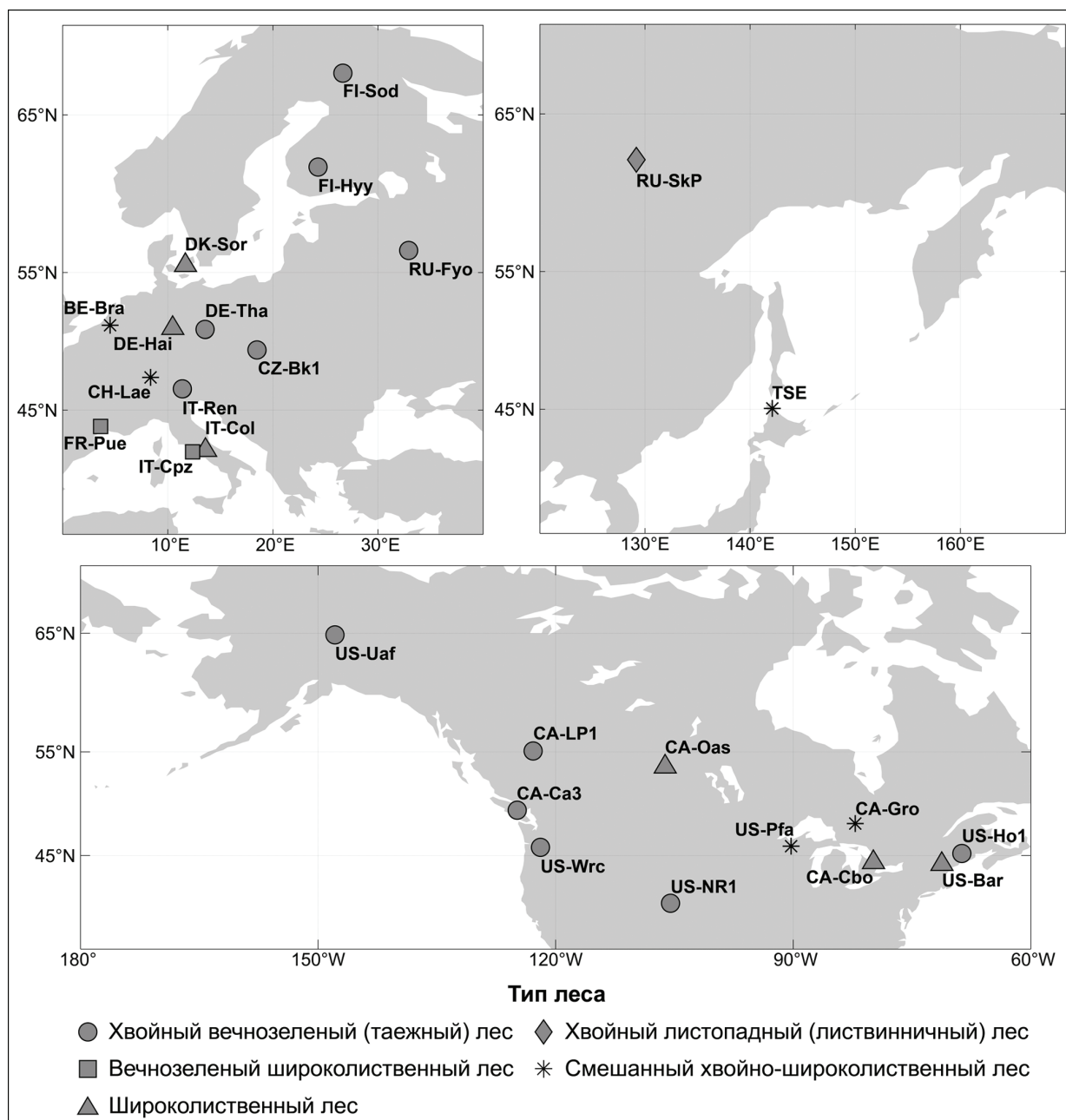


Рис. 1. Станции глобальной сети мониторинга FLUXNET, отобранные для анализа влияния экстремальных погодных условий на потоки CO_2

Fig. 1. The stations of global FLUXNET network selected for the analysis of the CO_2 flux response to extreme weather conditions

Таблица

Станции сети FLUXNET, выбранные для анализа отклика потоков CO₂ на аномалии температуры и осадков

Станция (код FLUXNET)	Тип биома (классификация IGBP)	Тип климата (по Кёппену)	Видовой состав древесного яруса растительности	Возраст древосто- я	Средняя высота древостоя, м	Период измерений
BE-Bra	Смешанный хвойно-широколи- ственный лес (Mixed Forest)	Cfb	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Quercus robur</i>	94	21	1999–2014
CA-Gro		Dfb	<i>Populus tremuloides</i> , <i>Picea marian</i> , <i>Picea glauca</i> , <i>Betula papyrifera</i> , <i>Abies balsame</i>	93	31	2003–2014
CH-Lae		Dfb	<i>Picea abies</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i>	52–185	30,6	2004–2014
US-PFa		Dfb	<i>Populus grandidentata</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Acer rubrum</i> , <i>Tilia tomentosa</i> , <i>Alnus incana</i>	110–120	24	1996–2022
TSE		Dfb	<i>Quercus crispula</i> , <i>Betula ermanii</i> , <i>Betula platyphylla</i> var. <i>japonica</i> , <i>Abies sachalinensis</i> , <i>Picea jezoensis</i>	175	18–25	2001–2002
CA-Oas	Широколиственный лес (Deciduous Broadleaf forests)	Dfc	<i>Populus tremuloides</i> , <i>Populus balsamifera</i> , <i>Corylus cornuta</i> , <i>Alnus crispa</i>	104	22	1996–2010
DE-Hai		Dfb	<i>Fagus sylvatica</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Acer plantanoides</i> , <i>Carpinus betulus</i>	250	33	2000–2012
DK-Sor		Cfb	<i>Fagus sylvatica</i>	102	25,8	1996–2014
IT-Col		Cwa	<i>Fagus sylvatica</i>	90	20,2	1996–2014
US-Bar		Dfb	<i>Fagus grandifolia</i> , <i>Acer saccharum</i> , <i>Betula alleghaniensis</i> , <i>Betula papyrifera</i> , <i>Tsuga canadensis</i>	120	19	2004–2017
CA-Cbo	Хвойный вечнозеленый (таеж- ный) лес (Evergreen Needleleaf forests)	Dfb	<i>Acer rubrum</i> , <i>Pinus strobus</i> , <i>Populus grandidentata</i> , <i>Fraxinus americana</i>	107	22	1995–2020
CZ-BK1		Dfb	<i>Picea abies</i>	27	12	2004–2014
DE-Tha		Cfb	<i>Picea abies</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Larix decidua</i> , <i>Pinus sylvestris</i>	136	25	1996–2014
FI-Hyy		Dfc	<i>Pinus sylvestris</i>	80	14	1996–2014
FI-Sod		Dfc	<i>Pinus sylvestris</i>	100	12,7	2001–2014
IT-Ren		Cfb	<i>Picea abies</i> , <i>Pinus cembra</i> , <i>Larix decidua</i>	90	29	1998–2013
RU-Fyo		Dfb	<i>Picea abies</i> , <i>Betula pubescens</i>	150	15	1998–2014
US-NR1		Dfc	<i>Abies lasiocarpa</i> , <i>Picea engelmannii</i> , <i>Pinus contorta</i>	118	18	1998–2014
CA-LP1		Csa	<i>Pinus contorta</i>	97	15	2007–2021
CA-Ca3		Cfb	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Thuja plicata</i> , <i>Abies grandis</i>	35	8	2001–2021
US-Ho1	Вечнозеленый широколиствен- ный лес (Evergreen Broadleaf forests)	Dfb	<i>Picea rubens</i> , <i>Pinus strobus</i> , <i>Tsuga canadensis</i>	130	20	1996–2020
US-Uaf		Dwc	<i>Picea mariana</i>	85	3	2003–2021
US-Wrc		Csb	<i>Picea rubens</i> , <i>Tsuga canadensis</i>	500	60	1999–2015
IT-Cpz		Csb	<i>Quercus ilex</i>	100	10	1997–2009
FR-Pue		Csa	<i>Buxus sempervirens</i> , <i>Quercus ilex</i>	129	19	2000–2014
RU-SkP	Хвойный листопадный (лист- венный) лес (Deciduous Needleleaf forests)	Dfc	<i>Larix</i> , <i>Salix</i> , <i>Betula pendula</i>	190	20	2012–2014

Анализ данных по потокам CO_2 , полученных со станций мониторинга, проводился в соответствии с международными рекомендациями для обработки данных измерений методом турбулентных пульсаций (eddy covariance). Среднесуточные значения потоков CO_2 для каждой выбранной станции были рассчитаны путем усреднения 30-минутных данных измерений. Пробелы в данных по потокам, вызванные перебоями в работе оборудования, слабой турбулентностью, осадками и др., были восстановлены с использованием программного пакета ReddyProc [Wutzler et al., 2018].

Среднесуточные значения температуры воздуха были рассчитаны на основе 30-минутных данных измерений или, при их отсутствии, трехчасовых данных реанализа. Среднесуточное количество осадков рассчитывалось как суточная сумма данных об осадках по данным реанализа с часовым временным разрешением или данным наблюдений на мониторинговых станциях с 30-минутным разрешением. Температурные аномалии были рассчитаны путем вычитания среднесуточного значения температуры воздуха, рассчитанного по данным реанализа за 1991–2021 гг., для каждого календарного дня.

Периоды экстремальных температур были определены как промежутки, когда аномалия среднесуточной температуры превышала 95% квантиль (для экстремально высоких температур) или не достигала 5% квантиля (для экстремально низких температур) функции плотности вероятности. Для анализа долгосрочных временных рядов по температуре было сделано предположение о его нормальном распределении [Железнова и Гущина, 2023]. Функции распределения были рассчитаны отдельно для каждого месяца и затем усреднены за весь период 1991–2021 гг.

Для определения порога экстремальных осадков были использованы два подхода. В первом подходе дни с экстремально обильными осадками были определены как дни с суточным количеством осадков, превышающим 95% квантиль функции плотности вероятности (для осадков применялось распределение Вейбулла). Второй подход был основан на оценке индекса *API* (Antecedent Precipitation Index), который определяет кумулятивный эффект выпавших осадков на потоки CO_2 . Индекс рассчитывался как [Li et al., 2021]:

$$API = \sum_{t=1}^M P_t k^t,$$

где P_t – количество осадков, выпавших за предшествующий заданному дню период продолжительностью t дней, M – продолжительность периода для расчета накопленного числа осадков, а k – параметр, характеризующий снижение вклада выпав-

ших осадков в текущее влагосодержание корнеобитаемого слоя почвы с течением времени. В нашем исследовании мы приняли, что M равно 14 дням, а k равно 0,8.

Экстремально высокий *API* определялся как аномалия, превышающая одно стандартное отклонение (СКО) временного ряда *API* на каждой станции. Чтобы исключить влияние сезонного цикла, СКО рассчитывалось отдельно для каждого месяца. Пороговым значением для чрезвычайно низкого *API* являлся порог в 5% от амплитуды временного ряда. Амплитуда была определена как разница между средним максимумом и средним минимумом *API* для каждого месяца, усредненная за 1991–2021 гг. Порог в 1 СКО неприменим для низкого *API*, поскольку СКО часто превышает среднее значение *API* для конкретного месяца, и, следовательно, значения ниже –1 СКО являются отрицательными, что невозможно для количества осадков.

Экстремально высокие / низкие аномалии потоков CO_2 были определены как превышающие ± 1 СКО временного ряда для каждого отдельного месяца.

Квантильный подход не применялся для потоков и *API*, так как их эмпирические функции распределения вероятности значительно различались в зависимости от типа экосистемы, что затрудняло выбор типа теоретического распределения. Кроме того, короткие временные ряды на нескольких станциях также затрудняли определение соответствующего теоретического распределения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ отклика потоков CO_2 на экстремальные погодные условия, связанные с экстремально высокими / низкими температурой и осадками, выявил высокое разнообразие реакций потоков CO_2 в разных типах тропических лесов. Внутригодовая изменчивость CO_2 обмена определяется главным образом сезонными изменениями фотосинтезирующей биомассы растительности [Gushchina et al., 2023]. В теплую половину года при оптимальных для роста растений температурах, приходящей солнечной радиации и влажности почвы скорость фотосинтеза древесных растений и дыхание экосистемы имеют максимальные значения как в хвойных, так и в лиственных лесах. В холодную половину года даже для вечнозеленых древесных пород фотосинтез или полностью отсутствует, или существенно подавлен в результате уменьшения притока солнечной радиации и низких температур воздуха. Поэтому в настоящем исследовании отклик различных типов лесных экосистем на аномальные погодные условия в теплое и холодное время года

рассматривался отдельно. Начало и конец тепло- го сезона определялись как устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 0°C на протяжении не менее семи последовательных дней. Для нескольких станций, находящихся в теп- лых климатических условиях с преобладающими на протяжении всего года положительными темпе- ратурами (например, станции в Средиземноморье), смена сезонов для листопадных лесов определялась по резкому изменению значений GPP, возникающе- му во время появления и опада листьев.

Во всех рассматриваемых лесных экосистемах в течение теплого полугодия в периоды экстремально высоких температур (превышающих 95% квантиль) наблюдалась положительная аномалия потока CO₂, соответствующая усилению эмиссии CO₂ в атмосфе-

ру (рис. 2А). В течение 29–33% дней с аномально вы- сокими температурами отмечались положительные аномалии потока CO₂, превышающие 1 СКО. Это обусловлено возможным уменьшением скорости фото- синтеза и снижением GPP в лесных экосистемах при аномально высоких температурах. Отрицательные аномалии CO₂ также наблюдались в периоды экстре- мально высоких температур, однако процент случаев с подобными эпизодами существенно ниже и состав- ляет 7–22% (см. рис. 2А). Противоположный отклик потоков CO₂ на повышение температуры может быть связан с отличиями в режиме увлажнения почвы в разных лесных экосистемах, что приводит к возник- новению как положительных, так и отрицательных аномалий потоков CO₂, наблюдаемых при экстре- мально высоких температурах.

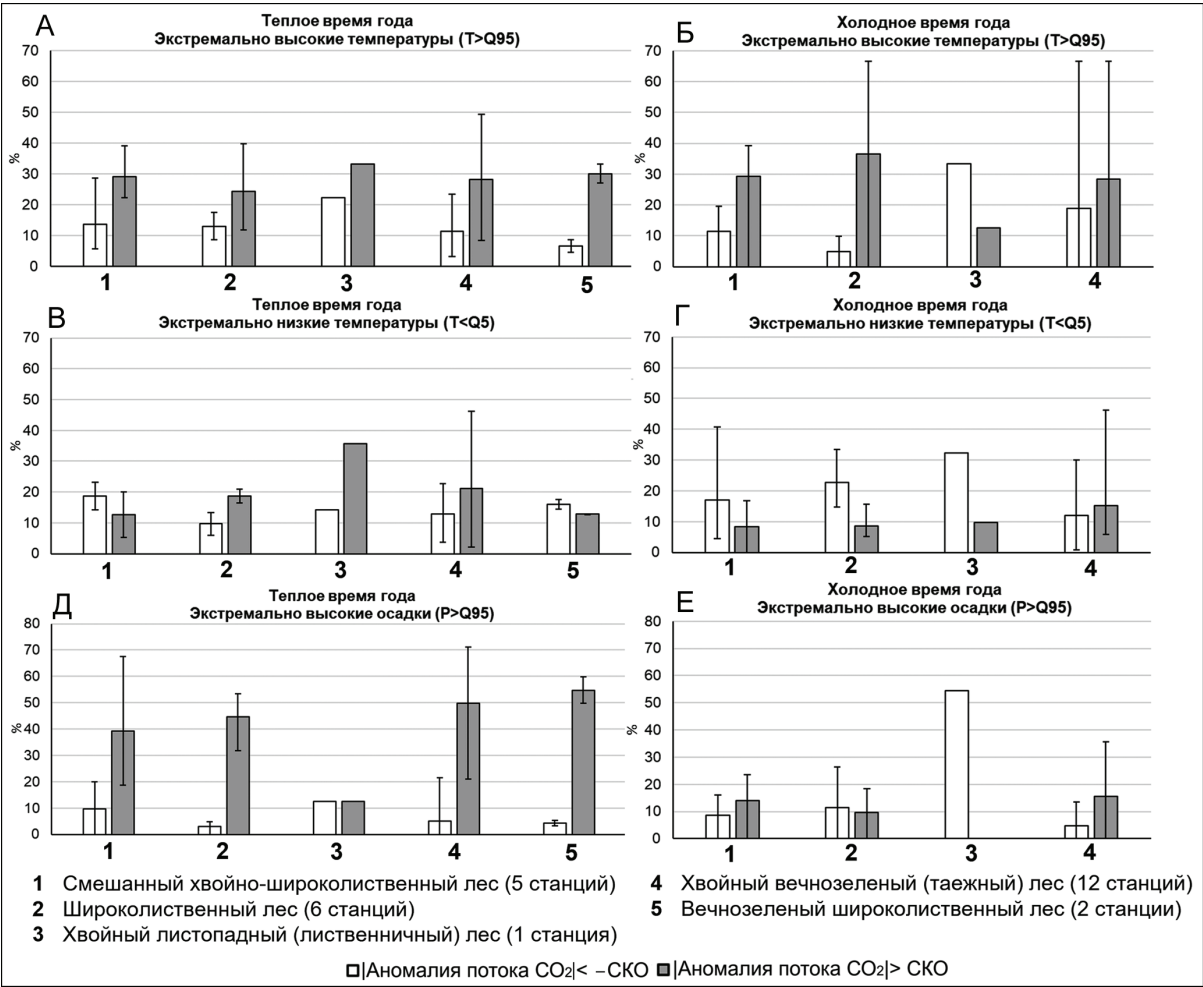


Рис. 2. Процент дней с аномалиями потока CO₂, превышающими 1 СКО и возникающими одновременно с экстремально высокими (А, Б) и низкими (В, Г) температурами и экстремально высокими (Д, Е) осадками в теплое (левая колонка) и холодное (правая колонка) время года. Столбиками показано среднее значение по биому, черными вертикальными отрезками – разброс % дней с аномалиями потока CO₂ по станциям внутри одного биота

Fig. 2. The percentage of days for different forest types when CO₂ flux anomalies greater than 1 STD occurred simultaneously with extremely high (A, B) and low (B, Г) temperatures and extremely high (Д, Е) precipitation during the warm (left column) and cold (right column) seasons. The column represents the mean for the biome, the black vertical whiskers show the spread of % of days across stations within one biome

Отклик потока CO_2 на отрицательные аномалии температуры в теплое время года существенно различается не только между различными типами лесных биомов, но даже и между лесами в пределах одного биома в зависимости от их географического положения, видового состава растительности и микроклиматических условий. Так, на трех станциях, расположенных в зоне смешанных лесов и на одной станции в зоне вечнозеленых широколиственных лесов, поглощение CO_2 устойчиво увеличивалось при отрицательных аномалиях температуры, что указывает на более благоприятные условия для фотосинтеза при относительно низких летних температурах. Однако для большинства станций, располагающихся в таежных, широколиственных и лиственных лесах положительные аномалии CO_2 при отрицательных аномалиях температуры наблюдались все же чаще, чем отрицательные (см. рис. 2В). Подобный эффект может быть связан с более интенсивным влиянием снижения температуры на физиологические процессы в растительности, чем на процессы в почвенном покрове.

Сравнивая влияние положительных и отрицательных аномалий температуры в теплый период на поток CO_2 можно увидеть, что экстремально высокие температуры оказывали более сильное влияние на поток CO_2 , чем экстремально низкие, и выражались преимущественно в увеличении эмиссии CO_2 в атмосферу. Это подтверждает гипотезу о том, что волны жары являются ключевым фактором, влияющим на структуру углеродного баланса во внетропических лесных экосистемах.

Влияние температурных аномалий на поток CO_2 в холодное время года проявлялось главным образом в изменении интенсивности дыхания экосистемы, регулируемой вариациями температуры воздуха. В холодный период рассматривалось только четыре биома, так как в вечнозеленых широколиственных лесах в условиях средиземноморского климата холодного периода не отмечалось (температуры устойчиво не опускались ниже 0°C). Оттепели (температура выше 95% квантиля) в зимний период в основном приводили к усилению эмиссии CO_2 в атмосферу (см. рис. 2Б), обусловленной увеличением дыхания экосистемы. Экстремально низкие температуры в холодный период, наоборот, сопровождалась отрицательными аномалиями потока CO_2 (см. рис. 2Г). В таежных лесах, расположенных в более высоких широтах, аномалии потока CO_2 наблюдались редко, что обусловлено очень маленькими значениями потоков в условиях низкой фотосинтетической активности растений.

Поскольку характеристики осадков (форма, интенсивность и продолжительность) резко различаются в теплый и холодный сезоны, можно ожидать,

что они могут вызывать разные изменения в потоке CO_2 . Для анализа использовались две характеристики режима осадков: суточное количество осадков, отражающее мгновенное влияние интенсивных осадков на потоки CO_2 , а также индекс API , отражающий кумулятивный эффект осадков за двухнедельный период.

Результаты анализа показали, что практически во всех рассматриваемых типах лесных экосистем обильные осадки в теплое время года приводили к увеличению эмиссии CO_2 в атмосферу: положительные аномалии потока $\text{CO}_2 > 1$ СКО отмечались в 40–55% дней с экстремальными осадками (см. рис. 2Д). Наблюдаемый отклик может быть связан с «эффектом Бирча» [Birch, 1964], который проявляется в интенсификации почвенного дыхания в результате резкого повышения влажности почвы и, как следствие, увеличения скорости разложения и минерализации органического вещества в почве при сильных осадках и интенсивном обводнении верхних почвенных горизонтов.

Кумулятивный эффект (API) от экстремально высоких осадков в теплый период характеризуется преобладанием экстремальных положительных аномалий потока CO_2 над отрицательными (рис. 3А). Однако процент дней с усилением поглощения CO_2 в течение двух недель после интенсивных осадков существенно выше, чем для мгновенного отклика. Увеличение поглощения CO_2 в период после обильных осадков может быть связано с усилением скорости фотосинтеза растительного покрова при солнечной погоде и оптимальных условиях почвенного увлажнения.

Продолжительный дефицит осадков, представленный экстремально низкими значениями API , в теплое время года сопровождался преимущественно отрицательными аномалиями потока CO_2 (усиление поглощения) в большинстве рассматриваемых лесных экосистем (см. рис. 3В). Это характеризует высокий адаптивный потенциал исследуемых лесных экосистем к кратковременным (менее 14 дней) периодам без осадков. С другой стороны, усилению поглощения CO_2 могла способствовать малооблачная погода, преобладающая в периоды без осадков, которая сопровождается увеличением притока прямой солнечной радиации и соответствующей активизацией процессов фотосинтеза. Положительные аномалии потока CO_2 встречались чаще отрицательных в лиственном лесу в центральной Якутии (см. рис. 3В, гистограмма 2), что отражает более сильное негативное влияние дефицита осадков на скорость фотосинтеза лиственных древостоев, чем на скорость экосистемного дыхания. Это может быть обусловлено, прежде всего, поверхностной структурой корневой системы древостоев, обуслов-

ливающей условия дефицита доступной влаги у древесных растений в продолжительные периоды без осадков. Кроме того, на увеличение экосистемного дыхания может оказывать влияние усиление гетеротрофного почвенного дыхания за счет вклада оттаивших богатых органическим веществом многолетнемерзлых грунтов.

В отличие от теплого времени года, когда осадки оказывают как прямое, так и косвенное влияние на поток CO_2 через изменение влажности почвы, воздействующее на скорость фотосинтеза и дыхания древесных растений, а также скорость эмиссии CO_2 с поверхности почвы, в холодный период года в

лесах умеренных широт при отрицательных температурах и устойчивом снежном покрове отсутствуют и прямые, и косвенные физические и биологические механизмы воздействия осадков на потоки CO_2 . В холодное время года реакцию потоков CO_2 на аномальные осадки и API можно ожидать лишь в начале и конце холодного сезона до установления снежного покрова и промерзания грунта, а также после таяния снежного покрова. Отклик потоков CO_2 на аномалии осадков может отмечаться в периоды оттепелей при полном исчезновении снежного покрова. Подобные периоды зафиксированы на станциях с морским умеренным климатом.

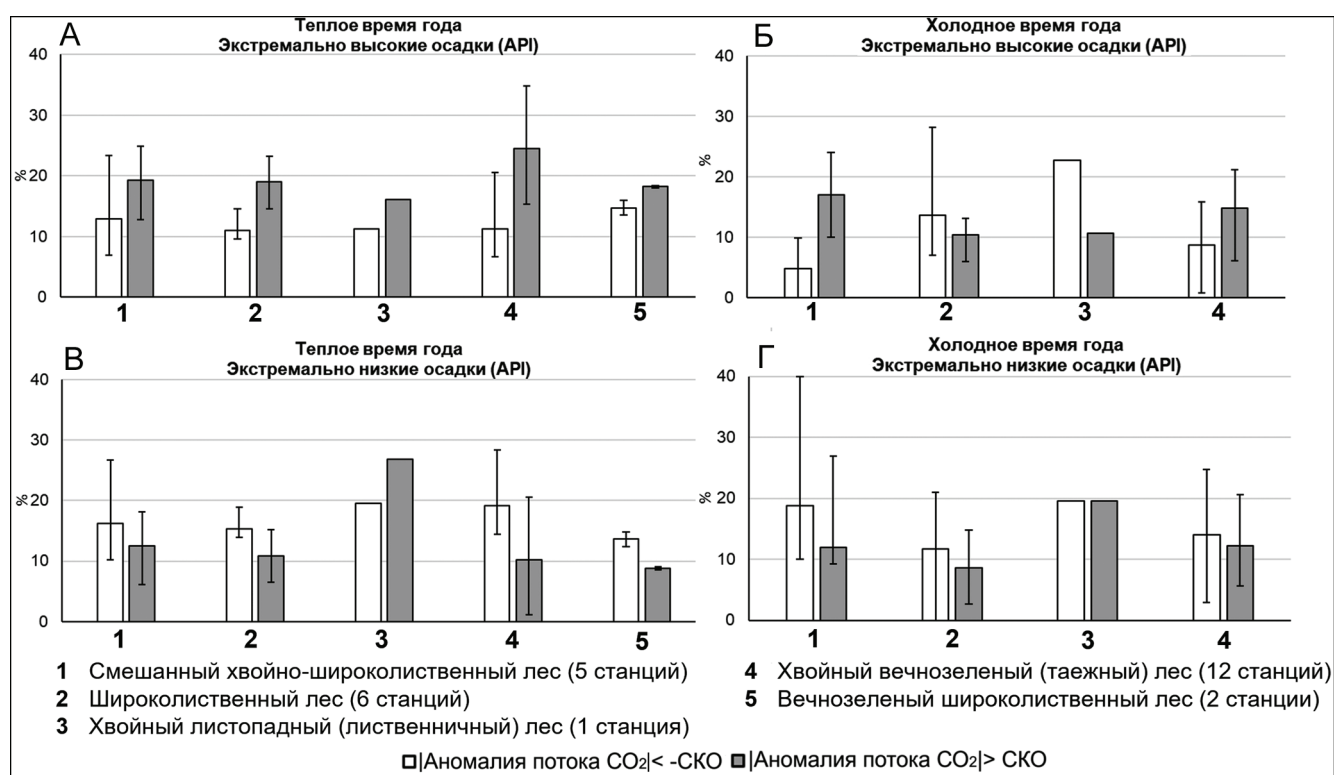


Рис. 3. Процент дней с аномалиями потока CO_2 , превышающими 1 СКО и возникающими одновременно с экстремально высокими (А, Б) и низкими (В, Г) API в теплое (левая колонка) и холодное (правая колонка) время года. Столбиками показано среднее значение по биому, черными вертикальными отрезками – разброс % дней с аномалиями потока CO_2 по станциям внутри одного биота

Fig. 3. The percentage of days when CO_2 flux anomalies greater than 1 STD occurred simultaneously with extremely high (A, B) and low (B, Г) API during the warm (left column) and cold (right column) seasons. The column represents the mean for the biome, the black vertical whiskers show the spread of % of days across stations within one biome

На станциях мониторинга в зоне распространения широколиственных лесов с морским климатом без постоянного снежного покрова, например в Дании (станция DK-Sor) и Италии (станция IT-Col), в зимние месяцы преобладало поглощение CO_2 в дни с экстремально большим количеством осадков (см. рис. 2Е, белый столбец под номером 2). В том же

типе леса на станциях DE-Hai и DK-Sor кумулятивное воздействие сильных осадков ($API > \text{СКО}$) также приводило к отрицательной аномалии потока CO_2 (см. рис. 3Б, белый столбец под номером 2). В смешанных хвойно-широколиственных лесах, напротив, положительные аномалии потока CO_2 наблюдались на 13% чаще, чем отрицательные аномалии.

Засушливые периоды, наблюдаемые в холодное время года (низкий *API*), вели к отрицательным аномалиям потока CO_2 на большинстве исследуемых станций (см. рис. 3Г), как и в теплый период года. Максимальный процент дней (40%) с сильными отрицательными аномалиями потока CO_2 , связанными с низким *API*, наблюдался в смешанном лесу в Швейцарских Альпах (станция CH-Lae).

Учитывая отсутствие прямого воздействия осадков на поток CO_2 в холодное время года в большинстве рассмотренных лесных экосистем, некоторые выявленные связи между аномалиями осадков и потоков CO_2 , особенно на станциях, расположенных в северных широтах, могли быть обусловлены комбинированным воздействием нескольких атмосферных факторов. Во многих случаях комбинированное воздействие, например, температуры и осадков может привести к положительным аномалиям потока CO_2 . Солнечная радиация также могла оказывать влияние, усиливая возникновение отрицательных аномалий потока CO_2 в периоды таяния снега, включая периоды без осадков.

ВЫВОДЫ

Анализ отклика потоков CO_2 на экстремальные погодные условия, связанные с экстремально высокими / низкими температурой и осадками, выявил высокое разнообразие реакций потоков CO_2 в разных типах лесных биомов внетропической зоны. Выявленные особенности отклика определялись совокупностью биотических и абиотических факторов, включая характер растительного покрова и региональные климатические условия, что требу-

ет дальнейших исследований и увеличения числа станций мониторинга.

Одним из ключевых результатов настоящего исследования является вывод о том, что в ответ на экстремальные погодные условия в лесных экосистемах умеренных широт чаще возникают положительные аномалии потоков CO_2 , т. е. усиление эмиссии CO_2 в атмосферу за счет ослабления ассимиляционных процессов в растениях. Усиление поглощения преобладает только при низких температурах в теплый период, а также при дефиците осадков как в теплый, так и в холодный период.

Условия экстремальной жары чаще вызывают аномалии потоков CO_2 , чем экстремально низкие температуры, что указывает на необходимость дальнейших исследований влияния волн жары на углеродный баланс.

Отклик потоков CO_2 на мгновенный и кумулятивный эффект аномальных осадков существенно различается: в момент выпадения интенсивных дождей в лесах умеренных широт значительно возрастает эмиссия CO_2 , тогда как продолжительный период с обильными осадками (до 14 дней) часто приводит к усилению поглощения CO_2 лесной экосистемой.

Разнообразие отклика лесных биомов на аномальную температуру и осадки указывает на сложный механизм отклика лесов на экстремальные погодные явления. Потоки CO_2 могут служить индикаторами состояния и функционирования растительного покрова и почвенной биоты. Очевидно, что подобные исследования требуют расширения числа исследуемых станций, включающих данные мониторинга потоков в различных типах лесных экосистем за большие интервалы времени.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 22–17–00073.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Железнова И.В., Гущина Д.Ю. Изменчивость экстремальных температур воздуха и осадков в конце XX и начале XXI века в различных природных зонах по данным реанализа ERA5 // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2023. Т. 59. № 5. С. 549–559. DOI: 10.31857/S0002351523050139.
- Кислов А.В., Торопов П.А., Платонов В.С. и др. Региональное моделирование климата для географического анализа // *Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. Геогр.* 2019. № 5. С. 3–12.
- Anjileli H., Huning L., Mofstakhari H. et al. Extreme heat events heighten soil respiration, *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 6632, DOI: 10.1038/s41598-021-85764-8.
- Belward A.S., Estes J., Kline K. et al. The IGBP-DIS global 1 km land-cover data set DISCover: A project overview, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, vol. 65, no. 9, p. 1013–1020.
- Birch H.F. Mineralisation of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions, *Plant and Soil*, 1964, p. 43–49.
- Charrier G., Martin-StPaul N., Damesin C. et al. Interaction of drought and frost in tree ecophysiology: rethinking the timing of risks, *Annals of Forest Science*, 2021, vol. 78, no. 2, p. 1–15, DOI: 10.1007/s13595-021-01052-5.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N. et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 2005, vol. 437, no. 7058, p. 529–533, DOI: 10.1038/nature03972.
- Dinsmore K.J., Billett M.F., Dyson K.E. Temperature and precipitation drive temporal variability in aquatic carbon and GHG concentrations and fluxes in a peatland catchment, *Global change biology*, 2013, vol. 19, no. 7, p. 2133–2148, DOI: 10.1111/gcb.12209.

- FAO. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report*, FAO, Rome, Italy, 2020, с. 11–23, DOI: 10.4060/ca9825en.
- Flannigan M.D., Stocks B.J., Wotton B.M. Climate change and forest fires, *Science of the total environment*, 2000, vol. 262, no. 3, p. 221–229, DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00524-6.
- Flower C.E., Gonzalez-Meler M.A. Responses of temperate forest productivity to insect and pathogen disturbances, *Annual review of plant biology*, 2015, vol. 66, p. 547–569, DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-115540.
- Forzieri G., Dakos V., McDowell N. et al. Emerging signals of declining forest resilience under climate change, *Nature*, 2022, vol. 608, no. 7923, p. 534–539, DOI: 10.1038/s41586-022-04959-9.
- Frank D., Reichstein V., Bach M. et al. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts, *Global change biology*, 2015, vol. 21, no. 8, p. 2861–2880, DOI: 10.1111/gcb.12916.
- Gazol A., Camarero J., Vicente-Serrano S. et al. Forest resilience to drought varies across biomes, *Global change biology*, 2018, vol. 24, no. 5, p. 2143–2158, DOI: 10.1111/gcb.14082.
- Gushchina D., Tarasova M., Sotosina E. et al. The Response of Daily Carbon Dioxide and Water Vapor Fluxes to Temperature and Precipitation Extremes in Temperate and Boreal Forests, *Climate*, 2023, vol. 11, no. 10, p. 206, DOI: 10.3390/cli11100206.
- Hoover D.L., Knapp A.K., Smith M.D. The immediate and prolonged effects of climate extremes on soil respiration in a mesic grassland, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, no. 4, p. 1034–1044, DOI: 10.1002/2015JG003256.
- Kramer K., Vreugdenhil S.J., Van Der Werf D.C. Effects of flooding on the recruitment, damage and mortality of riparian tree species: A field and simulation study on the Rhine floodplain, *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 255, no. 11, p. 3893–3903, DOI: 10.1016/j.foreco.2008.03.044.
- Kramer R.D., Ishii H.R., Carter K. et al. Predicting effects of climate change on productivity and persistence of forest trees, *Ecological Research*, 2020, vol. 35, no. 4, p. 562–574, DOI: 10.1111/1440-1703.12127.
- Li X., Wei Y., Li F. Optimality of antecedent precipitation index and its application, *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 595, p. 126027, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126027.
- Manzoni S., Chakrawal A., Fischer T. et al. Rainfall intensification increases the contribution of rewetting pulses to soil heterotrophic respiration, *Biogeosciences*, 2020, vol. 17, no. 15, p. 4007–4023, DOI: 10.5194/bg-17-4007-2020.
- Ritter F., Berkelhammer M., Garcia C. Distinct response of gross primary productivity in five terrestrial biomes to precipitation variability, *Communications Earth & Environment*, 2020, vol. 1, no. 1, p. 34, DOI: 10.1038/s43247-020-00034-1.
- Smith M.D. An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research, *Journal of Ecology*, 2011, vol. 99, no. 3, p. 656–663, DOI: 10.1111/j.1365-2745.2011.01798x.
- Ummenhofer C.C., Meehl G.A. Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, vol. 372, no. 1723, p. 20160135, DOI: 10.1098/rstb.2016.0135.
- Wutzler T., Lucas-Moffan A., Migliavacca M. et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc, *Biogeosciences*, 2018, vol. 15, no. 16, p. 5015–5030, DOI: 10.5194/bg-15-5015-2018.
- Xu B., Arain M., Black T. et al. Seasonal variability of forest sensitivity to heat and drought stresses: a synthesis based on carbon fluxes from North American forest ecosystems, *Global change biology*, 2020, vol. 26, no. 2, p. 901–918, DOI: 10.1111/gcb.14843.
- Zhang Z., Weimin Ju., Yanlian Z. et al. Revisiting the cumulative effects of drought on global gross primary productivity based on new long-term series data (1982–2018), *Global Change Biology*, 2022, vol. 28, no. 11, p. 3620–3635, DOI: 10.1111/gcb.16178.
- Электронный ресурс
The Data Portal Serving the FLUXNET Community, URL: <https://fluxnet.org/data/> (дата обращения 25.03.2023).

Поступила в редакцию 23.09.2023

После доработки 15.10.2023

Принята к публикации 04.12.2023

EFFECTS OF TEMPERATURE AND PRECIPITATION ANOMALIES ON CARBON DIOXIDE FLUXES IN THE EXTRATROPICAL FORESTS OF THE NORTHERN HEMISPHERE

E.M. Satosina¹, D.Y. Gushchina², M.A. Tarasova³, I.V. Zheleznova⁴, E.R. Emelianova⁵,
R.R. Gibadullin⁶, A.M. Osipov⁷, A.V. Olchev⁸

¹⁻⁸ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology
^{1,5} A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Science,
Laboratory of Ecological and Climatic Research

¹ Ph.D. student; e-mail: lisan.sat@gmail.com

² Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: dasha155@mail.ru

³ Ph.D. student; e-mail: mkolennikova@mail.ru

⁴ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: zheleznovaiv@my.msu.ru

⁵ Junior Scientific Researcher; e-mail: katikget@yandex.ru

⁶ Bachelor student; e-mail: rasil00121@mail.ru

⁷ Leading Engineer; e-mail: sashaosipov@list.ru

⁸ Professor, D.Sc. in Biology; e-mail: aolchev@gmail.com

Modern climate change, accompanied by rapidly increasing global air temperature, changing precipitation patterns, frequency and severity of extreme weather events, may have a significant impact on the functioning, growth, and development of forest ecosystems. The aim of the study was to assess the effects of extreme weather events (significant positive and negative anomalies in air temperature and precipitation) on the carbon dioxide (CO₂) fluxes in boreal and temperate forest ecosystems in the Northern Hemisphere. 26 greenhouse gas (GHG) flux monitoring stations of the global FLUXNET network with the most continuous observations were selected for the analysis of CO₂ fluxes. The stations are located in forest ecosystems of different biome types according to the IGBP classification. Meteorological conditions were analyzed using observations from meteorological stations and ERA5 reanalysis data. The results showed that the response of CO₂ fluxes to temperature and precipitation anomalies varies depending mainly on the type of forest ecosystem, its geographical location and regional climatic conditions. Extremely high air temperature in any season leads to increased CO₂ emissions to the atmosphere in all forest types studied, with the most pronounced response in coniferous forests. Negative air temperature anomalies in the warm season could have the opposite effect, either increasing or decreasing the CO₂ uptake by forest ecosystems, depending on the forest ecosystem type. No significant response of CO₂ fluxes to extremely low temperatures in the cold season was found. During periods of heavy precipitation, the emission of CO₂ to the atmosphere dominated in all forest ecosystems under study. At the same time, after a large amount of precipitation during the warm season, a cumulative effect of available soil moisture in the plant root zone on CO₂ fluxes was revealed. As a result the CO₂ uptake by vegetation increases due to the growing rate of plant photosynthesis under sufficient soil moisture conditions.

Keywords: forest ecosystems, reanalysis, eddy covariance measurements, FLUXNET

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 22-17-00073).

REFERENCES

- Anjileli H., Huning L., Moftakhari H. et al. Extreme heat events heighten soil respiration, *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 6632, DOI: 10.1038/s41598-021-85764-8.
- Belward A.S., Estes J., Kline K. et al. The IGBP-DIS global 1 km land-cover data set DISCover: A project overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, vol. 65, no. 9, p. 1013–1020.
- Birch H.F. Mineralisation of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions, *Plant and Soil*, 1964, p. 43–49.
- Charrier G., Martin-StPaul N., Damesin C. et al. Interaction of drought and frost in tree ecophysiology: rethinking the timing of risks, *Annals of Forest Science*, 2021, vol. 78, no. 2, p. 1–15, DOI: 10.1007/s13595-021-01052-5.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N. et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 2005, vol. 437, no. 7058, p. 529–533, DOI: 10.1038/nature03972.
- Dinsmore K.J., Billett M.F., Dyson K.E. Temperature and precipitation drive temporal variability in aquatic carbon and GHG concentrations and fluxes in a peatland catchment, *Global change biology*, 2013, vol. 19, no. 7, p. 2133–2148, DOI: 10.1111/gcb.12209.
- FAO. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report*, FAO, Rome, Italy, 2020, p. 11–23, DOI: 10.4060/ca9825en.
- Flannigan M.D., Stocks B.J., Wotton B.M. Climate change and forest fires, *Science of the total environment*, 2000, vol. 262, no. 3, p. 221–229, DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00524-6.

- Flower C.E., Gonzalez-Meler M.A. Responses of temperate forest productivity to insect and pathogen disturbances, *Annual review of plant biology*, 2015, vol. 66, p. 547–569, DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-115540.
- Forzieri G., Dakos V., McDowell N. et al. Emerging signals of declining forest resilience under climate change, *Nature*, 2022, vol. 608, no. 7923, p. 534–539, DOI: 10.1038/s41586-022-04959-9.
- Frank D., Reichstein V., Bach M. et al. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts, *Global change biology*, 2015, vol. 21, no. 8, p. 2861–2880, DOI: 10.1111/gcb.12916.
- Gazol A., Camarero J., Vicente-Serrano S. et al. Forest resilience to drought varies across biomes, *Global change biology*, 2018, vol. 24, no. 5, p. 2143–2158, DOI: 10.1111/gcb.14082.
- Gushchina D., Tarasova M., Satosina E. et al. The Response of Daily Carbon Dioxide and Water Vapor Fluxes to Temperature and Precipitation Extremes in Temperate and Boreal Forests, *Climate*, 2023, vol. 11, no. 10, p. 206, DOI: 10.3390/cli11100206.
- Hoover D.L., Knapp A.K., Smith M.D. The immediate and prolonged effects of climate extremes on soil respiration in a mesic grassland, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, no. 4, p. 1034–1044, DOI: 10.1002/2015JG003256.
- Kramer K., Vreugdenhil S.J., Van Der Werf D.C. Effects of flooding on the recruitment, damage and mortality of riparian tree species: A field and simulation study on the Rhine floodplain, *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 255, no. 11, p. 3893–3903, DOI: 10.1016/j.foreco.2008.03.044.
- Kramer R.D., Ishii H.R., Carter K. et al. Predicting effects of climate change on productivity and persistence of forest trees, *Ecological Research*, 2020, vol. 35, no. 4, p. 562–574, DOI: 10.1111/1440-1703.12127.
- Li X., Wei Y., Li F. Optimality of antecedent precipitation index and its application, *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 595, p. 126027, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126027.
- Manzoni S., Chakrawal A., Fischer T. et al. Rainfall intensification increases the contribution of rewetting pulses to soil heterotrophic respiration, *Biogeosciences*, 2020, vol. 17, no. 15, p. 4007–4023, DOI: 10.5194/bg-17-4007-2020.
- Ritter F., Berkelhammer M., Garcia C. Distinct response of gross primary productivity in five terrestrial biomes to precipitation variability, *Communications Earth & Environment*, 2020, vol. 1, no. 1, p. 34, DOI: 10.1038/s43247-020-00034-1.
- Smith M.D. An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research, *Journal of Ecology*, 2011, vol. 99, no. 3, p. 656–663, DOI: 10.1111/j.1365-2745.2011.01798x.
- Ummenhofer C.C., Meehl G.A. Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, vol. 372, no. 1723, p. 20160135, DOI: 10.1098/rstb.2016.0135.
- Wutzler T., Lucas-Moffan A., Migliavacca M. et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc, *Biogeosciences*, 2018, vol. 15, no. 16, p. 5015–5030, DOI: 10.5194/bg-15-5015-2018.
- Xu B., Arain M., Black T. et al. Seasonal variability of forest sensitivity to heat and drought stresses: a synthesis based on carbon fluxes from North American forest ecosystems, *Global change biology*, 2020, vol. 26, no. 2, p. 901–918, DOI: 10.1111/gcb.14843.
- Zhang Z., Weimin Ju., Yanlian Z. et al. Revisiting the cumulative effects of drought on global gross primary productivity based on new long-term series data (1982–2018), *Global Change Biology*, 2022, vol. 28, no. 11, p. 3620–3635, DOI: 10.1111/gcb.16178.
- Zheleznova I.V., Gushchina D.Y. Variability of Extreme Air Temperatures and Precipitation in Different Natural Zones in the Late 20th and Early 21st Centuries According to ERA5 Reanalysis Data, *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2023, vol. 59, no. 5, p. 549–559, DOI: 10.31857/S0002351523050139.
- Web-source*
The Data Portal Serving the FLUXNET Community, URL: <https://fluxnet.org/data/> (access date 25.03.2023).

Received 23.09.2023

Revised 15.10.2023

Accepted 04.12.2023